

ThermoMarE

**Fortschrittliche Thermoelemente-Technologie
für hybride maritime Heizsysteme unter
Einbeziehung elektrischer Batterietechnik**

Autorenliste

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. – Institut für Frontier Materials auf der Erde und im Weltraum

Pawel Ziolkowski

SCHEER Heizsysteme & Produktionstechnik GmbH

Constantin Kinias

Patrick Schmidt

Isabellenhütte Heusler GmbH & Co. KG

Nils Rink



1. Motivation und Projektziele

Energieeffiziente Lösungen in den Bereichen Energieerzeugung und -verbrauch sind entscheidend, um nationale und internationale Energie- und Klimaziele zu erreichen. Besonders im maritimen Sektor werden innovative Ansätze benötigt, die den branchenspezifischen Herausforderungen und Rahmenbedingungen in Deutschland gerecht werden.

Thermoelektrische Generatoren (TEG), aufgebaut aus thermoelektrischen Modulen (TEM Abb. 1), wandeln durch den Seebeck-Effekt – einen Festkörpereffekt, der insbesondere in halbleitenden Materialien sehr ausgeprägt ist – Wärme direkt in elektrische Energie um. Diese Technologie arbeitet ohne bewegliche Teile, ist nahezu wartungsfrei und gilt daher als äußerst robust. Die erzeugte elektrische Energie kann in Batterien gespeichert oder direkt zur Versorgung elektrischer Verbraucher genutzt werden. Die Leistungsfähigkeit von TEG hängt wesentlich von den erreichbaren Temperaturdifferenzen ab, die an installierte TEM geführt werden können. Mit steigendem Temperaturunterschied nehmen die generierte Thermospannung, die elektrische Ausgangsleistung und der Wirkungsgrad zu.

Da elektrische Energie an Bord meist nur begrenzt über Batterien, ineffizient über motorisch angetriebene Hilfsaggregate (Generatoren) oder durch Landstrom (ca. 0,40 €/kWh [1]) zur Verfügung steht, gewinnt Autarkie zunehmend an Bedeutung.

Ein Hier setzt das ThermoMarE-Projekt an: Ziel ist die Entwicklung autarker Heizsysteme, die ihre elektrische Energie direkt aus der beim Heizbetrieb entstehenden Wärme über einen TEG gewinnen. Solche Systeme können die Abhängigkeit von Batterien, Generatoren und Landstrom erheblich oder vollständig eliminieren. Überschüssige elektrische Energie kann in Batterien gespeichert und bei Bedarf, z. B. zum Start des Brenners, wieder abgerufen werden.

Zielgruppen der Projektentwicklung sind Spezialschiffe wie Arbeits- und Lotsenschiffe, Offshore-Versorger, Yachten, Segelschiffe, Solar- und Windschiffe sowie Binnenschiffe (Abb. 2), die bei Gesamtlängen von bis zu 20 m einen typischen Heizleistungsbedarf um 10 kW aufweisen.

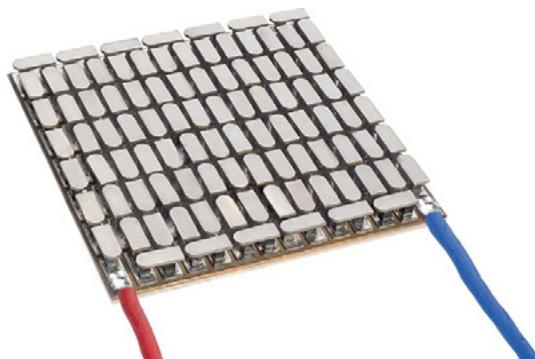


Abb. 1: HalbHeusler-TEM der Isabellenhütte, entnommen aus [2].

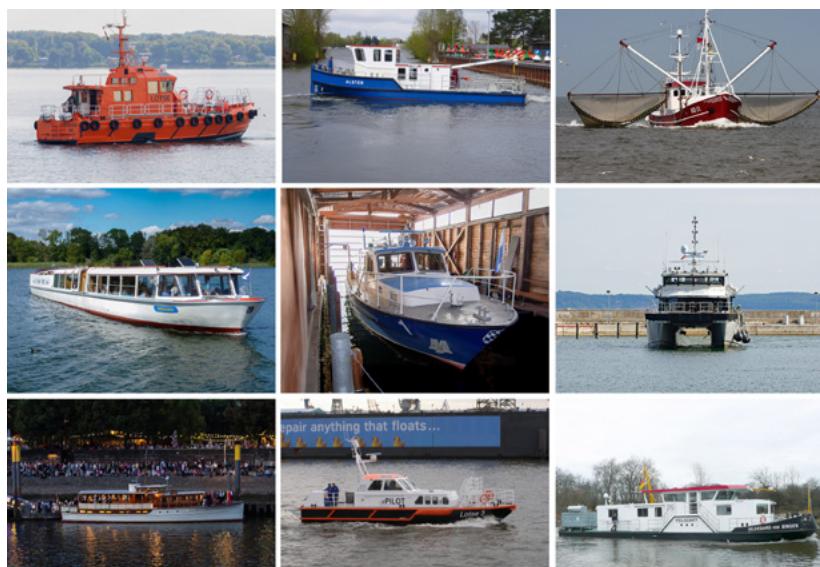


Abb. 2: Schiffstypen, derzeit mit SCHEER-Heizsystemen des energieeffizienten Typs blue efficiency® ausgestattet, für die eine TEG-Integration entwickelt wird.

Im Rahmen des ThermoMarE-Projekts soll ein System entwickelt und erprobt werden, das den elektrischen Eigenbedarf von Heizsystemen dieser Schiffstypen von ca. 100 W [3,4] durch einen integrierten TEG deckt. Ausgangspunkt der Arbeiten ist ein Heizsystem (Typ MARELA®) des Unternehmens Scheer, das mit TEM des Unternehmens Isabellenhütte ausgestattet werden soll.

Zentrales Ziel des ThermoMarE-Projektes ist die Entwicklung eines wirtschaftlich tragfähigen Konzepts zur Heizsystemautarkie mittels TEM sowie die Überführung in die maritime Praxis.

2. Methodik

Verschiedene Integrationsstellen innerhalb des Heizsystems wurden auf ihre Voraussetzungen zur Integration von TEM bewertet. Als Grundlage dienten Rahmenbedingungen des Heizsystems, darunter: Flächenangebot, Leistungsanforderung, Betriebssicherheit, Vorgaben zur Aufrechterhaltung der Stabilität und Effizienz der Verbrennung, sowie wirtschaftliche und technische Betrachtungen verschiedener Materialoptionen für TEM, Wärmetauscher, Verbindungsmaterialien und Dichtsysteme. Ergänzt wurde dies durch eine Anforderungsanalyse für die effiziente Integration der TEM, die benötigte Temperaturen, Wärmestromdichten, geometrische Toleranzen der Wärmetauscher und erforderliche mechanische Anpressdrücke zur Optimierung der thermischen Kopplung berücksichtigte.

Nach Festlegung des Integrationsortes am heißen Klöpperboden (Abb. 4) wurden Messungen an einem modifizierten Klöpperboden durchgeführt, der mit zwölf Typ-N Thermoelementsensoren zur Bestimmung lokaler Temperaturen (Sensor 1 – 12) ausgestattet wurde. Zusätzlich wurden zwei Temperaturfühler zur Messung der Wassertemperatur im Kessel (Sensor 13) sowie an der Abgasführung (Sensor 16) eingesetzt. Ferner wurde ein Prandtl-Staurohr am Abgasauslass eingesetzt um den Abgasdruck (Sensor 14) und den Volumenstrom (Sensor 15) zu messen. Die Messungen wurden bei verschiedenen stationären Sollwerten der Kesseltemperaturen

durchgeführt (65 °C – 95 °C), um einen repräsentativen Betriebsbereich des Heizsystems abzudecken.

Hiernach erfolgte eine Analyse des Ist-Heizsystems mittels numerischer Strömungssimulation (CFD – Computational Fluid Dynamics). Die experimentell äußert schwer zu bestimmende Gastemperatur nahe der Brennerdüse sowie die Strömungsgeschwindigkeit des Heißgases wurden in CFD-Simulationen variiert, mit dem Ziel Abweichungen zwischen empirischen Messdaten des Heizsystems und simulativen Ergebnissen zu minimieren, sowie belastbare Temperatur- und Wärmestrom-verteilungen als Grundlage für die Auslegung der Wärmetauscher und die Anpassung der TEM zu erhalten.

Mit den so ermittelten Randbedingungen wurden anschließend unterschiedliche Wärmetauscher-bauformen hinsichtlich ihrer Wärmeübertragung zwischen Heißgas und TEM durch weitere CFD-Simulationen bewertet, um thermische Betriebsbedingungen sowie Leistungsprognosen für TEM abzuleiten. Grundlage der Leistungsprognosen waren Messungen an TEM, deren Design an die simulativ ermittelten Randbedingungen und Ergebnisse der Anforderungsanalysen angepasst wurde. Die Ergebnisse der Simulationen wurden in die Konstruktion eines Wärmetauschers mit zweischaligem Klöpperboden überführt, der im Zwischenraum Platz zur Aufnahme von 6 TEM bietet.

Zur experimentellen Untersuchung der im Heizsystem erzeugbaren elektrischen Leistung wurde ein Laborversuchsstand konzipiert und mit dem zweischaligen Klöpperboden aus Aluminium ausgestattet. Die Wahl von Aluminium wird durch CFD-Simulationen gestützt (Abb. 5), die eine maximale Temperatur von 575 K zeigten, wobei später bei Bedarf ein Materialwechsel oder thermische Schutzbeschichtungen zur Temperaturanpassung möglich sind. Der Kaltseitenwärmetauscher wurde zusätzlich mit Kühlrippen zur Verbesserung der Wärmeabfuhr an das Wasser sowie mit Versteifungsrippen zur Minimierung mechanischer Verformungen ausgestattet. Die TEM-Kopplungsflächen beider Schalen wurden mit einer Parallelitäts-toleranz < 0,1 mm gefertigt. Zur Vermeidung einer Beschädigung

der TEM wurden zur Vorbereitung der Experimente zwei Sätze von Modellkörpern (je sechs TEM-Dummies) aus Inconel 600 hergestellt (Abb. 3). Die Kopplungsflächen aller Dummies entsprechen jenen der TEM ($25 \times 50 \text{ mm}^2$). Die Wärmeübergangskoeffizienten der Dummy-Sätze mit unterschiedlichen Dicken (12,97 mm / 24,45 mm) markieren Extrempunkte möglicher TEM-Auslegungen (500 W/m²K – 950 W/m²K). Jeder Dummy wurde mit erodierten Löchern nahe den Kopplungsflächen zur Aufnahme von Thermoelementen versehen.

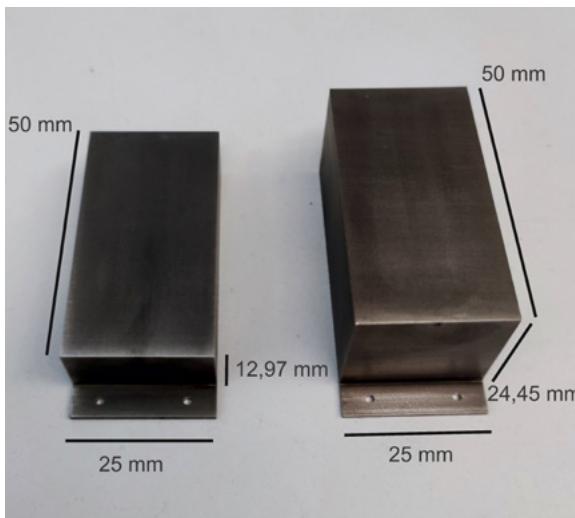


Abb. 3: Zwei verschiedene Ausführungen von TEM-Dummies aus Inconel 600.

Die Dummies ermöglichen die Messung von Temperaturdifferenzen am Installationsort der TEM. Mittels dieser Daten können in Kombination mit den bekannten Wärmeübergangskoeffizienten Wärme-flüsse berechnet und mit den Ergebnissen der CFD-Simulationen abgeglichen werden, wodurch Rückschlüsse auf die Güte der Wärmeübertragung sowie die Qualität der technisch-konstruktiven Umsetzung gezogen werden können.

3. Ergebnisse

3.1 Anforderungsanalyse, Bewertung der Integrationsorte und Analyse des Heizsystems ohne TEM

TEM der Isabellenhütte aus Halb-Heusler-Legierungen benötigen für optimale Ausgangsleistungen hohe Heißseiten-Temperaturen von bis zu 550 °C [2], während die Temperaturen an der Kaltseite 100 °C nicht überschreiten sollten. Alternative TEM auf Basis von Bi_2Te_3 erreichen ihre Maximalleistung bei Heißseiten-Temperaturen bis 250 °C [5]. Zur Minimierung des thermischen Kopplungswiderstands zwischen TEM und Wärmetauscher ist ein mechanischer Anpressdruck von mindestens 2 MPa erforderlich; zur Kompensation von Unebenheiten der involvierten Koppelflächen im Bereich < 200 µm werden die Übergänge mittels Graphitfolien ausgestattet.

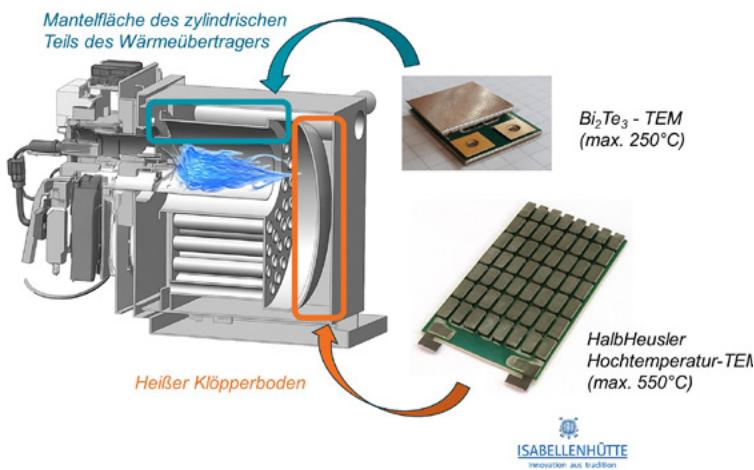


Abb. 4: Schnittansicht durch Brenner und Kessel des Heizsystems mit Angabe bewerteter Installationsorte für TEM aus Bi_2Te_3 und aus HalbHeusler-Legierungen der Isabellenhütte.

Für die Auswahl des Integrationsortes wurden Einbausituationen am heißen Klöpperboden sowie stromab an der Mantelfläche des zylindrischen Wärmeübertragerteils zwischen Brennkammer und Wasserkessel betrachtet (Abb. 4). Aufgrund der Prallstrombedin-

gung am Klöpperboden werden dort maximale Wärmefflusssichten und höchste Temperaturen erwartet, die einen Einsatz von Bi_2Te_3 -TEM nur bedingt zulassen, da ihre Wirtschaftlichkeit und thermische Langzeitstabilität unter den dort herrschenden Bedingungen kritisch bewertet wurde – ein Befund, der durch spätere Messungen am Heizsystem ohne TEM bestätigt wurde (Abb. 5).

Die Analyse der Bedingungen beider Installationsorte unter Berücksichtigung von Leistungsdichten zeigt, dass zur Erreichung einer Gesamtleistung von 100 W etwa 131 Bi_2Te_3 -TEM entlang der Abgasführung erforderlich wären, während am heißen Klöpperboden lediglich sechs HalbHeusler-TEM installiert werden müssten (Tab. 1). Im weiteren Projektverlauf wurde aufgrund der Vorzüge von HalbHeusler-TEM die Integration dieser Module am Klöpperboden verfolgt.

Tab. 1: Ergebnis der Abschätzung zur benötigten Anzahl von TEM für die Erreichung einer elektrischen Ausgangsleistung von 100 W in Abhängigkeit des Installationsortes.

	Installation von Bi_2Te_3-TEM am zylindrischen Teil des Wärmeübertragers	Installation von HalbHeusler-TEM am Klöpperboden
Elektrische Leistungsdichte [W/cm ²]	0,19	1,6
Benötigte Modulfläche [cm ²]	526	63
Thermische Leistungsdichte [W/cm ²]	5,5	39
Benötigte thermische Leistung [kW]	2,9	2,5
Anzahl der TEM []	131	6

Im Rahmen der Anforderungsanalyse für das Heizsystem wurden insbesondere konstruktive und thermische Schnittstellen definiert, um einen zuverlässigen und effizienten Betrieb zu gewährleisten. Die Verbindung zwischen heißem Klöpperboden (Heißseitenwärmeübertrager) und Brennkammer, muss wasserdicht ausgeführt werden um das Eindringen von Medien zu verhindern. Gleichzeitig muss dieser Teil des Klöpperbodens thermisch von der Mantelfläche des zylindrischen Teils des Wärmeübertragers entkoppelt werden, um unerwünschte Wärmeverluste zu minimieren, bzw. den Wärmetransport zu den TEM zu maximieren. Der Heißseitenwärmetauscher ist hierzu über eine Cerablancket-Dichtung thermisch von der Brennkammer isoliert, während drei O-Ring-Dichtungen eine wasser-dichte Verbindung sicherstellen. Die Fixierung der Wärmetauscher erfolgt über kreisförmig angeordnete Schraubverbindungen, in die Keramikbuchsen und -unterlegscheiben integriert sind, um thermische Kurzschlüsse zu minimieren. Federn an den Schraubverbin-dungen gewährleisten einen konstanten Anpressdruck, der über den Federweg ermittelt werden kann, und sichern so die zuverlässige Funktion der Dichtungen und die Effizienz der Wärmeübertragung. Der Zwischenraum im zweischaligen Klöpperboden ist mit einer dreifachen O-Ring-Dichtung gegen das Eindringen von Wasser in den Hohlraum gesichert, um die darin befindlichen TEM vor Kondensat und Leckagen zu schützen. Darüber hinaus erfordert die Verbindung zwischen Heiß- und Kaltseitenwärmetauscher eine wirksame thermische Entkopplung, um den Temperaturgradienten an den TEG zu maximieren (aktuell Isolation über Luft, perspektivisch über Hochleistungsdämmstoff). Zusätzlich darf die Gesamtdicke des Wärmetauschers, bestehend aus dem zweischaligen Klöpperboden, einen Wert von 120 mm nicht überschreiten, um die Installierbarkeit des Heizsystems an Bord der anvisierten Schiffsklassen sicherzustellen.

Messungen der Temperaturverteilung zeigen im Zentrum des modifizierten Klöpperbodens Maximalwerte von 575 K (Abb. 5). Die Temperaturverteilung auf dem gesamten Klöpperboden überstreicht einen Bereich von annähernd 200 K, wobei äußere Bereiche tendenziell die kältesten Zonen darstellen. Der am Gasauslass experimentell ermittelte Volumenstrom von 144,5 m³/h entspricht unter

Berücksichtigung des Rohrdurchmessers ($\varnothing = 35$ mm) am Orte des installierten Prandtl-Staurohres einer Gasaustrittsgeschwindigkeit von 41,7 m/s.

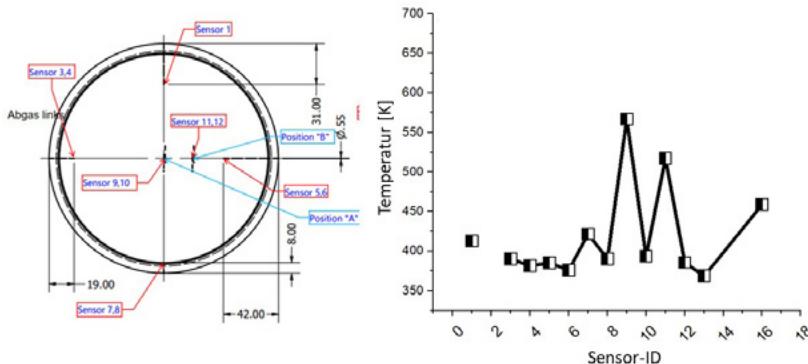


Abb. 5: Positionen der zwölf installierten Thermoelementsensoren im modifizierten Klöpperboden (links) und gemessene Temperaturen (rechts) bei einer Ist-Temperatur des Wasserkessels von 95,55 °C (Sollwert = 95 °C). Sensor 2 konnte aufgrund eines Defekts nicht ausgelesen werden.

Die Gasgeschwindigkeit und die Heißgastemperatur innerhalb der Brennkammer wurden als Randbedingungen der CFD-Simulationen in einem Bereich zwischen 1 m/s - 6 m/s bzw. 900 °C - 1.500 °C variiert. Unter Berücksichtigung der Messunsicherheiten der eingesetzten Sensoren ergibt sich die beste Übereinstimmung zwischen numerischen und experimentellen Daten für eine Gaseintrittstemperatur von 1.000 °C sowie für eine Gasentrittsgeschwindigkeit von 5,5 m/s.

Mit Ausnahme der Temperaturen am Randbereich des Klöpperbodens (Sensoren: T1 – T4, T7, T8), welche durch eine thermische Kopplung zwischen Klöpperboden und Mantelfläche beeinflusst werden (aufgrund fehlender Daten zum thermischen Übergangswiderstand dieser Komponenten wurde diese Kopplung in der CFD-Simulation als ideal angenommen), zeigt ein Temperaturvergleich Relativabweichungen von: -0.9 % (T9), +2 % (T10), +3.1 % (T11), +0.35 % (T11), -2.1 % (T5), +1.1 % (T6). Auch ein Vergleich der simulierten und gemessenen Abgastemperatur zeigt eine geringe

Relativabweichung von nur -1.1 % (T16). Durch die erzielte Übereinstimmung zwischen experimentellen Daten und Simulationsergebnissen konnte das CFD-Modell im Rahmen seiner eigenen Unsicherheit ($\pm 20\%$, bezogen auf Wärmeflüsse) validiert werden. Auf Basis dieser Ergebnisse überträgt das Heizsystem ohne TEM eine Gesamtleistung von $13,9 \text{ kW} \pm 2,7 \text{ kW}$ in das Wasser. Hiervon entfallen $2,6 \text{ kW} \pm 0,54 \text{ kW}$ auf die Wärmeübertragung am Klöpperboden.

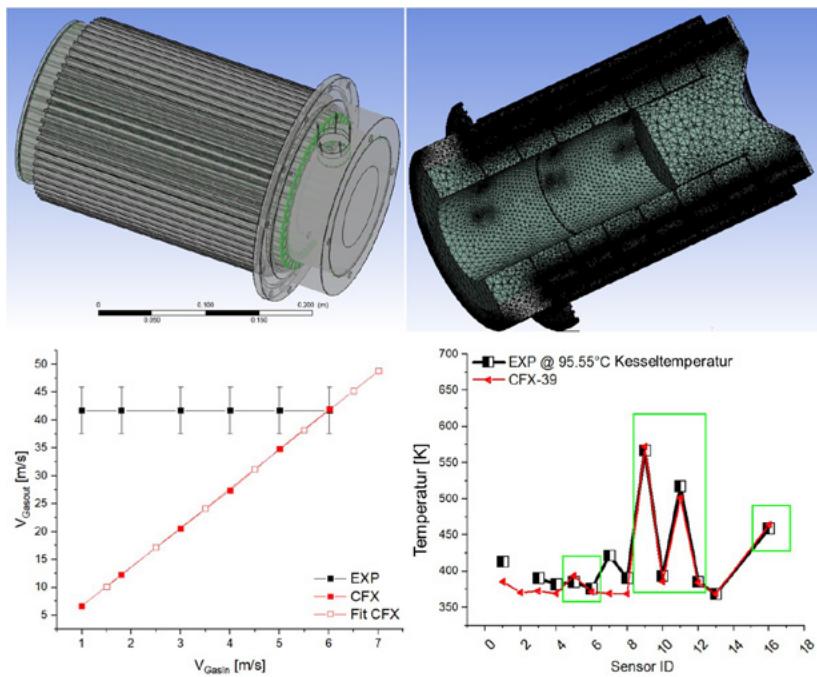


Abb. 6: Dreidimensionales (3D) Geometriemodell des Heizsystems (oben links). Schnittbild durch das vernetzte CFD-Modell mit $30 \cdot 10^6$ Knoten (oben rechts). Vergleich der experimentell und numerisch bestimmten Gasaustrittsgeschwindigkeit (unten links) und Vergleich der Temperaturverteilung im Klöpperboden (unten rechts – grüne Markierung kennzeichneten Temperaturmessstellen, die nicht oder nur geringfügig von einer thermischen Kopplung zwischen Klöpperboden und Mantelfläche beeinflusst werden).

3.2 CFD-Simulationen zur Optimierung des Klöpperbodens und TEM-Leistungsprognose

Sieben Varianten von Oberflächenstrukturierungen des heißen Klöpperbodens wurden mittels CFD-Simulationen untersucht.

Ziel war die Verbesserung der konvektiven Wärmeübertragung aus dem Heißgas durch Oberflächenvergrößerung, ausgehend von der glatten Oberfläche des originalen Klöpperbodens.

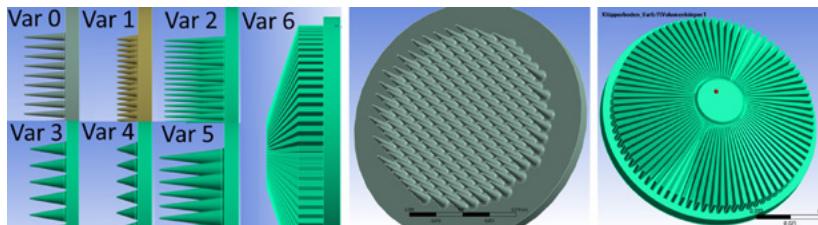


Abb. 7: Sieben Varianten von Oberflächenstrukturen (links) des heißen Klöpperbodens. Varianten Var0 – Var5 beinhalteten unterschiedlich dimensionierte stiftförmige, konisch zulaufende Oberflächenstrukturen (Mitte) während in Var6 eine radiale Anordnung von Rippenstrukturen (rechts) untersuchte wurde.

Für stiftförmige Strukturen steigt die Wärmeabsorption monoton mit der zur Verfügung stehenden Oberfläche des Klöpperbodens (Abb. 8). Stifte mit größeren Basisradien haben bei gleicher Gesamtoberfläche aufgrund eines reduzierten Wärmleitungswiderstandes leichte Vorteile gegenüber dünneren Stiften (vgl. grüne und schwarze Kurven in Abb. 8). Insgesamt kann mit dünneren Stiften jedoch auf der systembedingt limitierten Fläche des Klöpperbodens eine größere Gesamtfläche dargestellt und damit mehr Wärmeleistung aus dem Gas extrahiert werden. VAR2 erzielt mit >1.8 kW und einer Maximaltemperatur von 975 K die höchsten Werte. Im Vergleich zum Heizsystem ohne TEM reduziert sich die Wärmeübertragung am Klöpperboden durch Installation der TEM infolge des zusätzlichen Wärmewiderstandes. Dies kann durch Oberflächenvergrößerung und damit Reduktion des konvektiven Wärmewiderstandes mit den hier betrachteten Varianten nicht kompensiert werden.

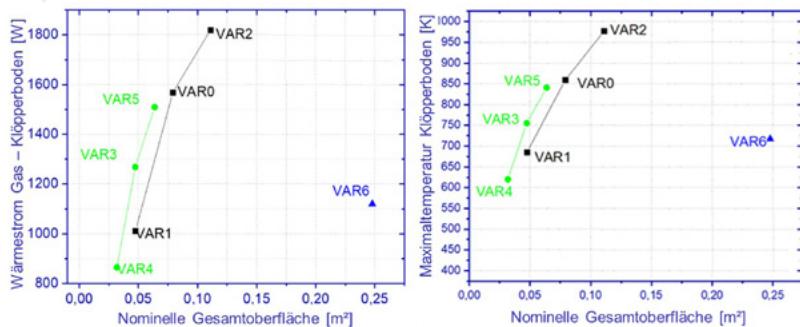


Abb. 8: Simulierter Wärmeeintrag (links) und maximale Oberflächentemperatur (rechts) in Abhängigkeit der nominellen Gesamtoberfläche des Klöpperbodens für sieben Oberflächenstrukturvarianten.

VAR6 erzielt trotz größter Oberfläche nur relativ geringe Werte bei Wärmeextraktion und Maximaltemperatur. Analysen zeigen, dass der Abstand der Rippenstrukturen zu dicht gewählt wurde, wodurch die heiße Gasströmung aufgrund des hohen Strömungswiderstandes nicht tief genug in die Zwischenräume eindringen kann und damit große Teile der nominellen Fläche nicht effektiv zur Wärmeextraktion beitragen können (Abb. 9).

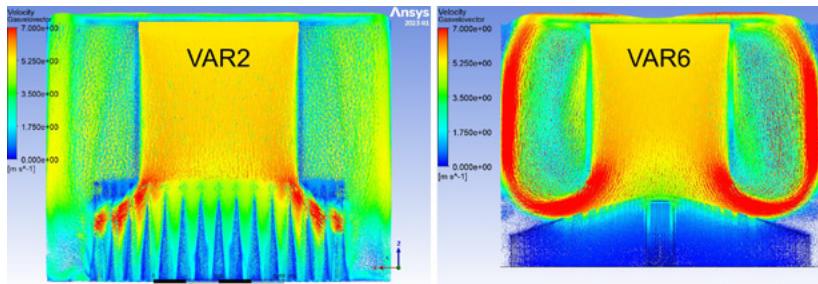


Abb. 9: Vergleich der Strömungsgeschwindigkeit für VAR2 (links) und VAR6 (rechts).

Zur Abschätzung der Leistungsfähigkeit der TEM unter Betriebsbedingungen des Heizsystems wurden angepasste HalbHeusler-TEM aufgebaut und in einem Thermogeneratorprüfstand charakterisiert (Abb. 10). Die Messergebnisse von zwei bzw. vier aufeinanderfol-

genden Temperaturzyklen an zwei unterschiedlichen TEM bei Heißseitentemperaturen von bis zu 500 °C bestätigen die geringe Varianz und gute Stabilität der Module sowie Ausgangsleistungen von über 19 W pro Modul. Dies entspräche bei sechs installierten TEM einer Gesamtleistung von 114 W und unterstreicht das Potenzial zur Erreichung der Zielmarke von 100 W im Heizsystem.

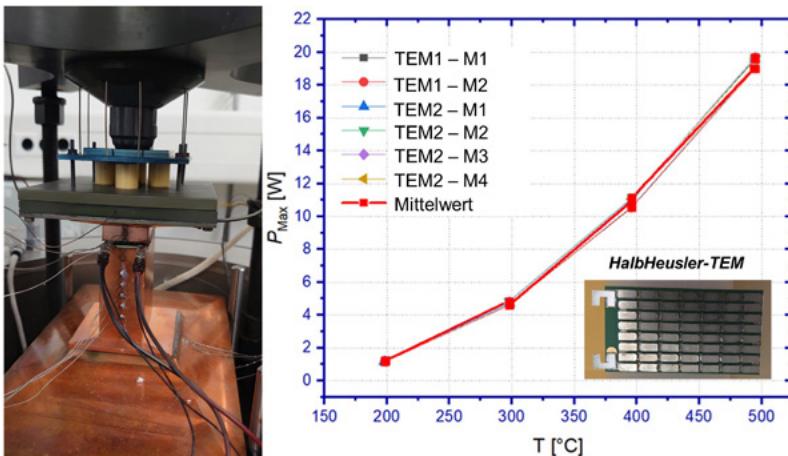


Abb. 10: Messaufbau im Thermogenerator-Prüfstand (links) und ermittelte Maximalleistung der HalbHeusler-TEM (rechts).

3.3 Ergebnisse experimenteller Untersuchung des Heizsystems mit TEM-Dummies am Laborversuchsstand

Insgesamt wurden vier Versuchsreihen (V1-V4) am Laborversuchsstand (Abb. 11, Abb. 12) mit einem 10 kW-Brenner und Kessel sowie mit TEM-Dummies durchgeführt. Hierbei wurden Anpressdruck und Dummies variiert und im letzten Versuch die Wassertemperatur im Kessel abgesenkt (Tab. 2). Ziel war der Nachweis thermischer Bedingungen aus der Anforderungsanalyse, insbesondere die Einhaltung der maximal zulässigen TEM-Kaltseitentemperatur (100 °C) als Vorbereitung für Tests mit echten TEM.

Tab. 2: Überblick zu Parametern und Temperaturmessdaten der Versuchsreihen (V1-V4) am Laborprüfstand

Versuch	Anpressdruck [MPa]	Wassertemperatur [°C]	Dicke Dummy [mm]
V1	2	65	12,97
V2	0,8	65	12,97
V3	2	65	24,45
V4	2	20	24,45
Heißseitentemperatur [°C] Bereich / Ø	Kaltseitentemperatur [°C] Bereich / Ø	Mittlere Temperaturdifferenz [K]	
203-245/223	118-223/153	70	
136-231/196	93-146/119	77	
184-257/217	90-131/105	112	
163-236/196	59-101/75	121	

V1 zeigte unerwartet niedrige Heißseitentemperaturen und zu hohe Kaltseitentemperaturen. In V2 wurde der Anpressdruck verringert, um einer Wölbung des Kaltseitenwärmetauschers als mögliche Ursache für die zu hohen Kaltseitentemperaturen entgegenzuwirken. Die Druckabsenkung verringerte die Temperaturen sämtlicher Messstellen auf der Kaltseite signifikant; jedoch nicht ausreichend. Im Mittel fielen die Temperaturen an der kalten Seite stärker als auf der heißen Seite (mittlere Temperaturdifferenz stieg gegenüber V1 um 10%). Zur weiteren Absenkung der Kaltseitentemperatur wurden in V3 dickere Dummies eingesetzt, deren höherer Wärmewiderstand (geringerer Wärmestrom) zu einen reduzierten Temperatursprung an Kaltseitenkopplung und damit eine Annäherung der Kaltseitentemperaturen an die Wassertemperatur erwarten ließ. Die Kaltseitentemperaturen sanken gegenüber V2 nochmals ab. In V4 wurde aus diesem Grund die Wassertemperatur auf 20 °C gesenkt. Eine solche Kesseltemperatur ist im Heizbetrieb nicht üblich und sollte lediglich den Nachweis einer ausreichend niedrigen Kaltseitentempe-

ratur erbringen, um folgende Tests mit echten TEM zu ermöglichen. Im Mittel konnte in V4 die Kaltseitentemperatur auf 75 °C gesenkt werden. Einzelne Messstellen weisen jedoch immer noch zu hohe Temperaturen für den Einsatz von TEM auf.



Abb. 11: Laborversuchsstand ThermoMarE mit Heizgerät (rechts), Wärmetauscher zur Abgabe der Wärme an die Umgebung (links) sowie Steuerungs- und Messtechnik.



Abb. 12: Kalte Schale des Klöpperbodens mit TEM-Dummies (links), Signaldurchführungen der Sensoren und Schraubenverbindungen zur Einstellung des Anpressdruckes (Mitte), heiße Schale mit Stiftstruktur zur Wärmeabsorption (rechts).

Die Temperaturen aller Versuchsreihen bleiben gegenüber den Vorhersagen der CFD-Simulationen weit zurück. Ausgehend von den Temperaturmessdaten der TEM-Dummies aus dem ersten Versuch (Wassertemperatur = 65 °C) wurden Wärmestrome für jeden Dummy berechnet. Hiernach summiert sich der Wärmestrom durch fünf Dummies (Sensor 2 defekt) auf einen Wert von 350 W und bleibt damit ebenfalls hinter den Erwartungen zurück.

Durch eine Versuchsserie am Thermogeneratorprüfstand wurde der flächenbezogene thermische Kopplungswiderstand der Graphitfolie temperatur- und druckabhängig als Vergleichswert bestimmt (Abb. 13). Der Vergleich mit den berechneten thermischen Kopplungswiderständen aus den Messungen am Laborversuchsstand des Heizsystems und den Daten des Thermogeneratorprüfstands zeigt, dass der thermische Übergangswiderstand innerhalb des Heizsystems ca. 10-fach höher liegt als unter vergleichbaren Bedingungen des Thermogeneratorprüfstandes.

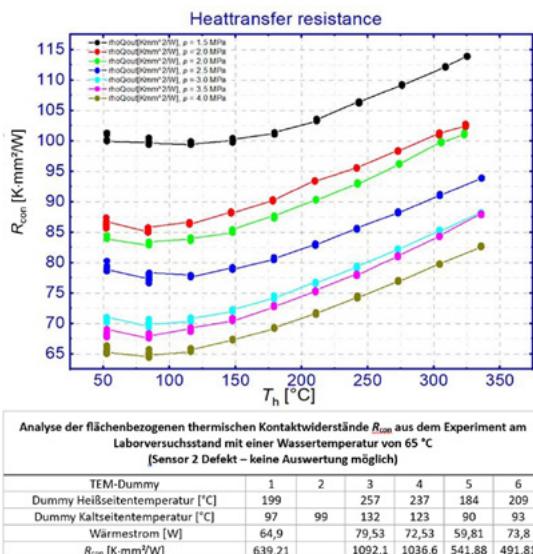


Abb. 13: Messergebnisse des Thermogeneratorprüfstandes zum flächenbezogenen thermischen Kopplungswiderstand der Graphitfolie in Abhängigkeit der Temperatur für verschiedene mechanische Anpressdrücke (oben) und Analyseergebnisse des Experiments am Laborprüfstand des Heizsystems mit Auswertung von Wärmeflüssen durch die TEM-Dummies und den thermischen Kopplungswiderständen zum Kaltseitenwärmeübertrager – kalte Schale des Klöpperbodens (unten).

Der zweischalige Klöpperboden wurde daraufhin demontiert. Es wurde festgestellt, dass sich die TEM-Dummies wie auch die Graphitfolien verschoben hatten, was die schlechten Ergebnisse der Versuche an dem Prüfstand des Heizsystems erklärt. Die kalte

Schale des Klöpperbodens hatte sich trotz Versteifungsrippen mechanisch verformt, was sich durch einen mit einer Lehre feststellbaren Luftspalt zeigte (Abb. 14).



Abb. 14: Nach Demontage des Klöpperbodens wurde eine Wölbung der kalten Schale festgestellt.

4. Gesamtbewertung und Ausblick

Im Rahmen des ThermoMarE-Projekts wurde ein Laborversuchsstand zur Untersuchung der TEM-Integration in maritime Heizsysteme entwickelt und in Betrieb genommen. HalbHeusler-TEM wurden auf die Betriebsbedingungen des Heizsystems angepasst, hergestellt und charakterisiert. Mit repräsentativen TEM-Dummies konnte die grundlegende Funktionsfähigkeit bestätigt und ein technologischer Reifegrad TRL 4 erreicht werden.

Resultate von CFD-Simulationen zeigen in Verbindung mit Messergebnissen, die im Thermogeneratorprüfstand an HalbHeulser-TEM ermittelt wurden, dass das Heizsystem prinzipiell autark betrieben werden kann. Nach diesen Untersuchungen sollte bei einer Wärmeeinkopplung von etwas über 1.8 kW eine elektrische Ausgangsleistung um 100 W durch Installation von sechs HalbHeusler-TEM am Klöpperboden erzielt werden können.

Die experimentellen Ergebnisse am Laborversuchsstand zeigen, dass die Temperaturgradienten über den TEG-Dummies aktuell nicht ausreichen, um die angestrebte elektrische Leistungsabgabe zu erzielen. Die Werte für Wärmeströme und Temperaturen liegen deutlich unter den Erwartungen. Ferner können echte Halb-Heusler-TEM derzeit nicht im Heizsystem getestet werden, da die Kaltseitentemperaturen zu hoch und nahe den maximal zulässigen Werten liegen. Aus Ursache zeigte sich eine Verformung des Kaltseitenwärmetauschers. Die thermischen Kopplungswiderstände liegen um den Faktor 10 höher, als dies für Graphitfolien erwartet werden kann.

Für die Realisierung des Autarkieziels müssen Materialwahl, Konstruktion und Auslegung der Komponenten weiter optimiert werden, um Temperaturgradienten zu erhöhen, thermische Kopplungswiderstände zu reduzieren und die strukturelle Steifigkeit zu verbessern.

Literatur

[1] Landstrompreise der Stadtwerke Duisburg, https://www.stadtwerke-duisburg.de/geschaeftkunden/energiedienstleistungen/landstrom/landstrom-english-version?utm_source=chatgpt.com, aufgerufen 20.10.2025

[2] Datenblatt des HalbHeusler TEM des Herstellers Isabellenhütte GmbH & Co. KG, <https://www.isabellenhuette.com/hubfs/Files/Data-sheets/LE/Thermogenerator.pdf>, aufgerufen am 17.10.2025

[3] Datenblatt des Heizsystems nano des Herstellers SCHEER Heizsysteme & Produktionstechnik GmbH, https://scheer-heizsysteme.de/upload/Upload/downloads/mobile_nano_anleitung_de.pdf, aufgerufen am 20.10.2025

[4] Datenblatt der Pumpe UPM3 Auto 25-50 180 ZZZ des Herstellers Grundfos GmbH, <https://product-selection.grundfos.com/de/products/upm3-upm4-oem/upm3-auto-oem/upm3-auto-59C93503?pumpsystemid=2726647529&tab=variant-specifications>, aufgerufen am 20.10.2025

[5] P. Ziolkowski et al. Validation of commercial Bi₂Te₃-based thermoelectric generator modules for application as metrological reference samples. Measurement 2021, Vol. 177, 109247, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109247>

